

RENFORCEMENT DES DIGUES DE LOIRE PAR LA METHODE DU DEEP SOIL MIXING : CONTROLE PAR TECHNIQUES GEOPHYSIQUES

LEVEES REINFORCED BY THE DEEP SOIL MIXING METHOD IN THE LOIRE AREA : CONTRIBUTION OF GEOPHYSICAL METHODS FOR THE ASSESSMENT

Yannick FARGIER¹, Yannick ANANFOUET¹, Yasmina BOUSSAFIR², Sérgio PALMA LOPES³, Alain LE KOUBY², Edouard DURAND¹, Lucile SAUSSAYE¹

¹ Cerema Normandie Centre, Laboratoire Régional de Blois

² IFSTTAR, site de Marne La Vallée

³ LUNAM Université, IFSTTAR, site de Nantes

RÉSUMÉ – Pour pallier à la décroissance du niveau de sûreté (dégradation) des digues dans le temps, la technique de renforcement in situ de type « Soil Mixing » rencontre un engouement croissant. Cette technique ne dispose pas d’outil d’auscultation permettant de déterminer la qualité de réalisation. Cet article présente une qualification de méthodes géophysiques (sismique, radar, électrique) pour l’auscultation de ces ouvrages.

ABSTRACT – To palliate the decrease of the safety level of levees in time, the “Deep Soil Mixing” method presents an interesting trade-off. However this kind of reinforcement technique doesn’t have assessment method to determine the quality of construction. We propose in this paper a synthesis of research qualifying geophysical methods (seismic, radar, electric) for the assessment of these reinforcement structures.

1. Introduction

La préservation des ouvrages de lutte contre les inondations est une composante forte de la politique de développement durable. Au sein de ces ouvrages anciens, des phénomènes d’écoulements internes sont à l’origine de dégradations (érosion interne) pouvant amener à la ruine des ouvrages.

Les « écrans étanches » type sol-ciment permettent à la fois de renforcer le comportement mécanique de l’ouvrage et de diminuer sa perméabilité hydraulique ainsi que son érodabilité et donc sa durabilité (Fonseca *et al.*, 2009). La méthode dite du « soil mixing » par voie humide consiste à mélanger le sol en place sur de grandes hauteurs à l’aide d’une trancheuse en y incorporant du liant et de l’eau (figures 1.a et 1.b).

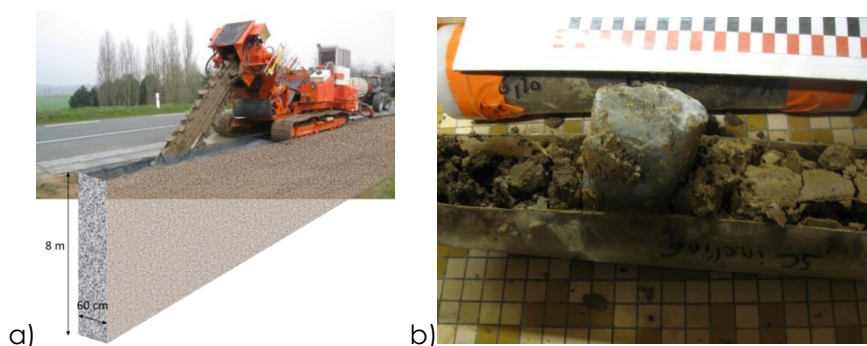


Figure 1. a) Ecran en cours de réalisation par la technique TRENCHMIX®, b) élément de carotte issue de l'écran présentant un surdosage en ciment.

En théorie l'action de la trancheuse malaxeuse (TRENCHMIX®) doit permettre le mélange et l'homogénéisation du milieu sur toute la hauteur (Porbaha *et al.*, 2000). Cependant, le mélange est en pratique incomplet présentant des ségrégations et donc une certaine hétérogénéité du matériau. Cette hétérogénéité peut avoir des conséquences néfastes sur les performances attendues de l'ouvrage (mauvais rapport E/C, perméabilité élevée...) (Fonseca *et al.*, 2009 ; Larsson, 2001).

Dans ce cadre, plusieurs techniques géophysiques ont été testées afin de qualifier leur potentiel pour la réception et le suivi de ces ouvrages, à savoir les méthodes de tomographie sismique, radar et électrique (Beck *et al.*, 2011).

Trois phases distinctes impliquant des travaux en laboratoire, de modélisation numérique et in situ ont été réalisées. En laboratoire, des mesures physiques ont été effectuées (résistivité, permittivité, vitesse des ondes P et S) sur des échantillons présentant différents dosages en ciment et différents temps de cure.

Les résultats issus des trois phases de recherche ont permis de différencier le potentiel de contrôle et de suivi des méthodes géophysiques testées, de préciser leurs limitations et de présenter des perspectives d'optimisation.

2. Essais en laboratoire

L'objectif de cette première phase est de déterminer la sensibilité de grandeurs physiques (Beck *et al.*, 2011) à des variations de formulation de mélange sol-ciment. Les grandeurs sont :

- la résistivité électrique : capacité du matériau à s'opposer au passage du courant (Hammad, 2013) ;
- la permittivité diélectrique : capacité du matériau à former des dipôles électriques ;
- la vitesse des ondes P et S.

Plusieurs facteurs vont avoir un impact sur les propriétés d'un mélange sol-ciment (Porbaha *et al.*, 2000, Larsson, 2001) :

- la formulation (teneur en ciment/sol/eau du mélange) ;
- la qualité du mélange ;
- le temps de cure ;
- le type de ciment ;
- la nature du sol.

Pour la constitution des éprouvettes, deux types de sols sont étudiés à savoir un sol fin (Tours) et un sol plus grossier (Sigloy). Plusieurs formulations sont étudiées (figure 2.a) (en kg de ciment/m³ de sol sec) : 140, 210 et 280 kg/m³ et enfin une pâte de ciment pur. Le ciment utilisé correspond au ciment utilisé sur les chantiers de Sigloy et Tours, à savoir un CEM III/C 32,5. Pour le mélange la teneur en eau est fixée à la limite de liquidité du sol. Trois éprouvettes sont réalisées par formulation (figure 2.b) afin de tenir compte de la dispersion des résultats. Les éprouvettes sont conservées en immersion dans l'eau et les mesures géophysiques sont réalisées aux temps de cure suivants (en jours) : 7, 14, 28, 60, 90 et 120.

Les figures 2.c et 2.d présentent la cellule utilisée pour la mesure de résistivité électrique des échantillons. La résistivité moyenne de l'échantillon est recalculée en fonction des cinq mesures réalisées.

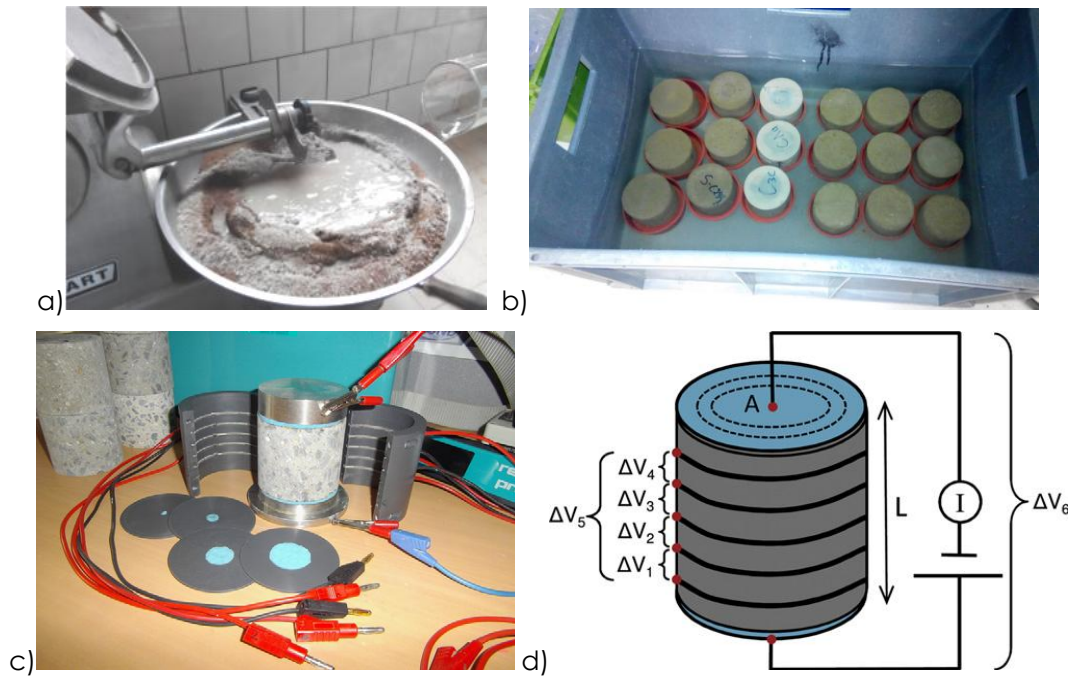


Figure 2. Présentation a) du mélange réalisé par le malaxeur, b) des échantillons à différentes formulations diamètre 75*75mm conservé pour les essais géophysiques, c) de la cellule électrique de l'IFSTTAR et d) du principe de mesure de la cellule

La figure 3 présente les résultats des mesures en laboratoire de résistivité électrique pour toutes les formulations réalisées et à différents temps de cure. Ces résultats indiquent une sensibilité importante de la résistivité électrique en fonction de la formulation et du temps de cure. Les résultats obtenus avec les mesures sismiques sont similaires aux résultats de résistivité électrique. Concernant la permittivité diélectrique, les résultats montrent que cette grandeur n'est capable de différencier ni les sols entre eux, ni le temps de cure, ni la formulation. Seuls les échantillons de pâte de ciment sont discriminés. Des essais complémentaires de résistance à la compression simple ont été réalisés sur des échantillons de même formulation mais de géométrie différente (éprouvette cylindrique 50x100). Ces résultats sont cohérents avec la littérature et indiquent une corrélation intéressante avec les résultats de résistivité électrique et de vitesse des ondes P.

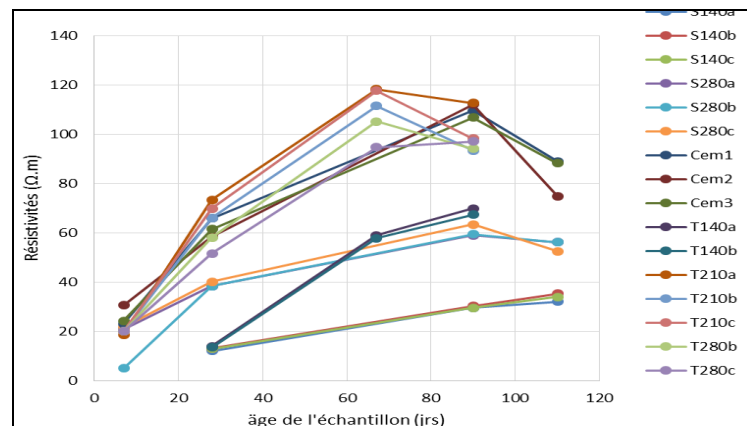


Figure 3. Evolution de la résistivité électrique au cours du temps pour toutes les formulations étudiées. La nomenclature des échantillons est (hormis ciment pur Cem1 à 3) « Site (S :Sigloy ; T : Tours) » « Teneur (kg de ciment / m³ de matériau) »

3. Modélisation numérique

L'objectif de cette partie est de donner les limitations des techniques d'imagerie géophysique in situ dans le cas le plus favorable qu'il soit. En effet, son principe réside dans la construction de modèles géologiques parfaits sur lesquels sont simulées numériquement les méthodes géophysiques.

Cette partie présente exclusivement les résultats de modélisations numériques de la méthode géoélectrique. En effet, la simulation de l'objet qui nous intéresse nécessite un maillage 3D complexe. Or, nous n'avons à notre disposition qu'un seul logiciel permettant cette modélisation, dédié aux modélisations électriques.

La figure 4 présente le milieu modélisé, à savoir une digue de plusieurs centaines de mètres de long, de 5 m de hauteur et de largeur de crête, de 25 m de largeur de base avec des pentes de 2H/1V. L'écran étanche est modélisé quasiment au centre de la crête, sur 8 m de profondeur et 60 cm de largeur. La résistivité du sol naturel est fixée à 50 $\Omega.m$ tandis que la résistivité de l'écran est fixée à 100 $\Omega.m$.

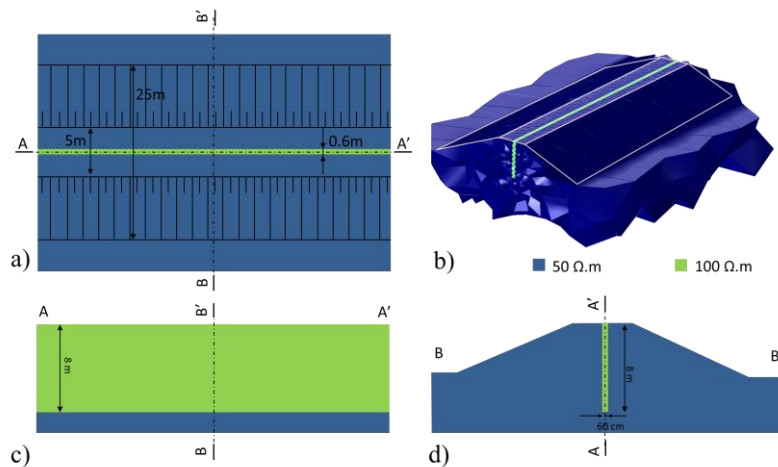


Figure 4. Présentation du milieu simulé par éléments finis de la digue (en bleu) et de l'écran étanche (en vert). Une vue en plan (a) en perspective (b) section longitudinale (c) et transversales (d) sont présentées

La figure 5 présente le cas d'une simulation de campagne Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) transverse à l'écran. L'objectif est de voir la capacité de la méthode à imager l'écran dans son environnement. La figure 5.a présente le modèle tandis que la figure 5.b présente les résultats d'inversion pour un écran deux fois plus résistant que l'encaissant (résultat du haut) et un écran quatre fois plus résistant que l'encaissant (résultat du bas). Les données sont acquises en simulant 96 électrodes espacées de 50 cm avec un protocole dipôle-dipôle. Les données sont inversées à partir du logiciel Res2dinv avec pour seule option particulière le doublement du nombre de paramètres entre chaque électrode.

Les résultats montrent que l'écran est mieux reconstruit lorsqu'il présente un contraste de résistivité supérieur avec le milieu encaissant. Cependant, pour les deux résultats, seuls les 2 à 3 premiers mètres de l'écran peuvent être identifiés sur les coupes. En dessous de cette profondeur, la perte de résolution en profondeur (inhérente à la méthode) a pour conséquence de ne plus permettre la détection de l'écran n'offrant donc pas de réponse intéressante à la problématique.

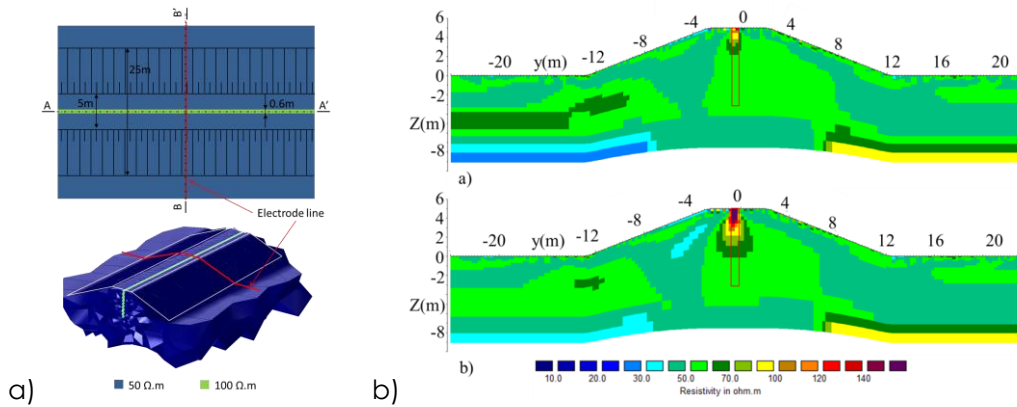


Figure 5. Présentation a) du modèle géométrique en éléments finis (en bas) et d'une vue en plan du modèle (en haut) et b) des résultats d'inversion des données pour un écran étanche de résistivité 100 Ω .m (en haut) et 200 Ω .m (en bas)

La figure 6 synthétise les résultats d'une campagne réalisée entre forages (cross-hole) dans l'écran. En effet, la perte de résolution en profondeur étant inhérente à la méthode, nous proposons d'utiliser des mesures en forage pour limiter ce point. Pour cela trois anomalies sont ajoutées à l'écran étanche (figure 6.i). Trois cas d'études en forage sont étudiés avec une distance inter forage de 1,5, 3 et 6 m. Les résultats d'inversion pour l'espacement de 6 m sont présentés à la figure 6.ii).

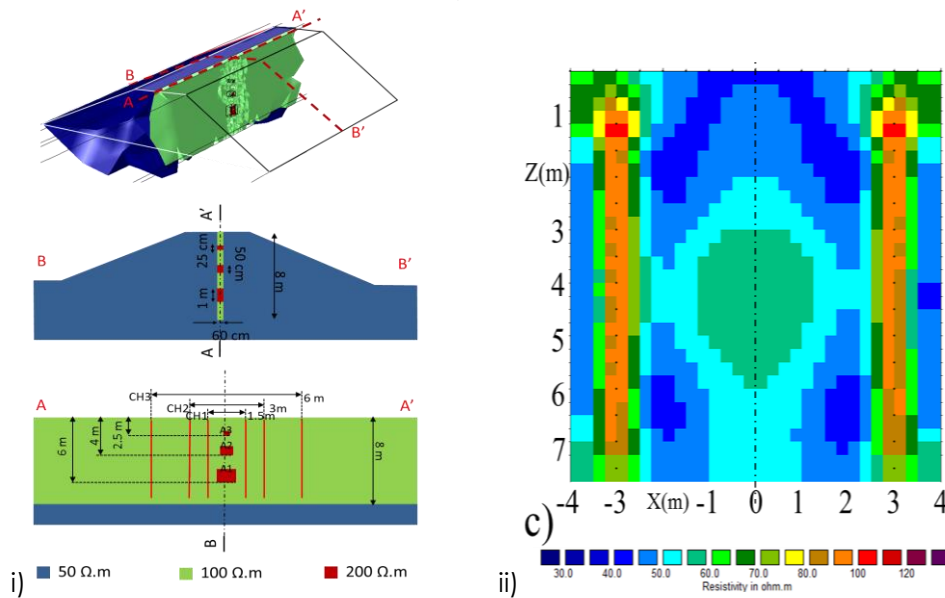


Figure 6. Présentation i) du modèle géométrique en éléments finis utilisé, avec en rouge les anomalies simulées dans l'écran et ii) les résultats d'inversion. Les traits rouges verticaux représentent les positions des mesures en forages pour les trois études

Ces résultats montrent des résistances élevées à proximité des forages qui sont proches de la résistivité de l'écran et une résistivité faible en dehors des forages. Les trois anomalies ne sont clairement pas détectables sur ces résultats d'inversion quel que soit l'espacement entre les forages. Les structures inversées (en dehors des zones de forages) peuvent être interprétées comme des artéfacts liés au caractère 3D de la zone non prise en compte dans l'inversion. En conséquence, bien que les données simulées

ne soient pas entachées de bruit (principe du crime inverse), les résultats démontrent que l'utilisation de la TRE dans les configurations conventionnelles présentées ne permet pas de répondre à la problématique.

4. Essais in situ

L'objectif de cette partie est de présenter une étude géophysique utilisant des outils conventionnels adaptés à une auscultation « grand rendement » d'un ouvrage réel. L'idée était de démontrer le caractère inopérant de la méthode dans son utilisation conventionnelle, tout du moins pour répondre aux objectifs de la problématique.

Parmi toutes les campagnes de terrain réalisées, seules les campagnes de TRE transversale et en forage sont présentées ci-dessous. Les campagnes non présentées par soucis de clarté de l'article sont i) une campagne de TRE longitudinale à l'ouvrage, ii) une campagne de radar en forage et iii) une campagne sismique en forage.

4.1. Campagne TRE Transversale

La figure 7 présente le résultat d'inversion (res2dinv) obtenu à partir de mesures réalisées transversalement à l'ouvrage. Pour cela un protocole de type dipôle-dipôle est réalisé à partir de 96 électrodes espacées de 50 cm. La profondeur d'investigation moyenne est de 10 m, permettant d'atteindre la couche de gravas qui se situe à la base de l'écran étanche. Cette tomographie est issue l'itération 5 du processus d'inversion avec une erreur RMS de 1,2 %. Le résultat d'inversion permet une bonne restitution de la géologie du site et de l'ouvrage. Concernant l'écran étanche, la capacité de détection de celui-ci est faible et limitée aux deux premiers mètres sous la surface.

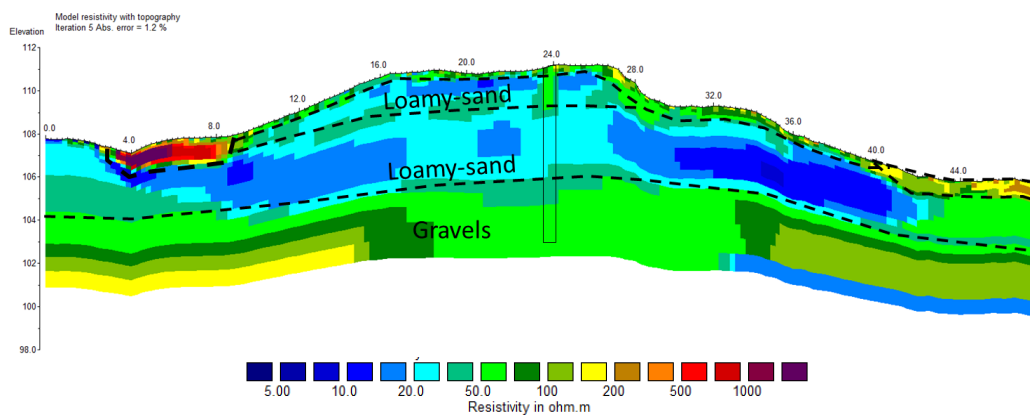


Figure 7. Coupe transversale de la résistivité électrique de la digue. La position de l'écran étanche est surimposée par un rectangle noir. Les couches composant la digue sont également distinguées par un tracé en pointillés

4.2. Campagne TRE en forage

La figure 8 présente les résultats obtenus à partir de l'inversion des résistivités apparentes obtenues en forage. Le résultat de TRE cross-hole est présenté à l'itération 5 avec une erreur RMS de 1,2 %. Les données sont acquises à partir de deux protocoles, à savoir un dipôle-dipôle équatorial et un dipôle-dipôle diagonal. Les électrodes sont positionnées tous les 25 cm en profondeur (points noirs) jusqu'à 4,75 m. Le contact écran/électrode est assuré par l'ajout d'eau dans les forages. Il peut être noté que bien que le forage ait atteint 8 m de profondeur, la présence de gravas non mélangés à partir de 6 m génère un milieu trop perméable pour que l'essai soit réalisé dans de bonnes

conditions (ajout de fluide pour le contact électrique). En conséquence, le fond du forage a été scellé par un coulis de ciment, limitant la pose d'électrodes à 4,75 m de profondeur. La tomographie est entachée de nombreux artéfacts liés aux effets 3D. Ces artéfacts sont similaires aux simulations précédemment réalisées. A proximité des forages, la tomographie semble cependant permettre une discrimination du comportement des terrains corrélés avec les paramètres de forage sur cette zone, à savoir une résistance mécanique et électrique plus élevée à droite jusqu'à 3 m de profondeur puis à gauche jusqu'à la fin du forage. En conséquence, la faible plus-value présentée précédemment ne permet pas de combler le caractère « faible rendement » et « destructif » de la méthode. Cette aspect permet de conclure à sa non applicabilité d'un point de vue opérationnel.

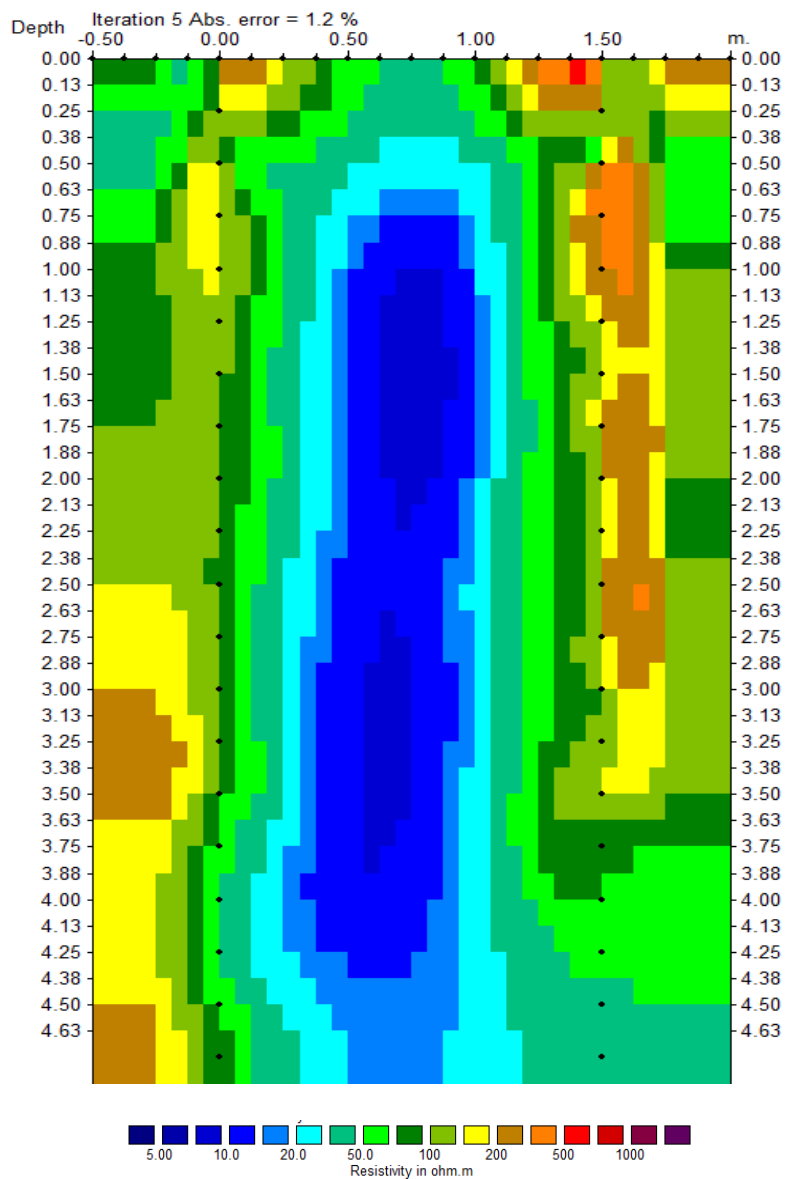


Figure 8. Résultat de tomographie de résistivité électrique en forage. La position des électrodes est surimposée (points noirs) sur le résultat. La distance entre les deux forages est de 1,5 m. Le résultat présente une erreur RMS de 1,2 % à l'itération 5

5. Conclusion

Une étude complète intégrant des mesures en laboratoire, de la modélisation numérique et des essais in situ est présentée, son objectif étant de tester la pertinence d'utilisation de différentes méthodes géophysiques pour l'auscultation des écrans étanches sol-ciment. Un caractère « grand rendement » des méthodes doit être conservé afin que ces travaux gardent une applicabilité dans le cadre opérationnel.

Les résultats de l'étude en laboratoire montre que les paramètres résistivité électrique et vitesse des ondes P sont sensible à la fois à la formulation et au temps de cure. Inversement, les résultats obtenus avec la sonde électromagnétique montrent que la permittivité diélectrique est un paramètre qui n'est sensible ni à la formulation ni au temps de cure.

L'étude numérique a permis de démontrer les limitations de deux stratégies d'acquisition TRE in situ, à savoir une tomographie 2D transversale à l'ouvrage et une tomographie inter forages positionnée dans l'écran. En effet, la perte de résolution en profondeur (cas transversal) et les effets 3D liés à la forme de l'écran (cas en forage) limitent fortement l'utilisation de cette méthode pour la reconnaissance de ce type d'ouvrage.

Les deux stratégies d'acquisition précédentes sont réalisées sur un ouvrage réel. La campagne de tomographie transversale à l'ouvrage permet une bonne description de l'ouvrage lui-même et une très faible reconnaissance de l'écran étanche. Concernant la tomographie en forages, les résultats montrent que la tomographie est entachée d'erreurs de reconstruction limitant très fortement son analyse. En conséquence, dans leur utilisation conventionnelle, les techniques présentées ne présentent pas d'intérêt réel pour l'auscultation de ce type de renforcement de corps de digue.

Dans un avenir proche nous espérons tester des techniques géophysiques sortant du cadre d'utilisation conventionnel afin d'assurer une plus grande robustesse aux résultats tout en gardant un rendement élevé.

6. Références bibliographiques

- Beck, Y. L., Lopes, S. P., Ferber, V., and Côte, P. (2011). Microstructural Interpretation of Water Content and Dry Density Influence on the DC-Electrical Resistivity of a Fine-Grained Soil. *Geotechnical Testing Journal*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA., 34(6), pp. 1-14.
- Fonseca, A. V., Cruz, R. C., and Consoli, N. C. (2009). Strength Properties of Sandy Soil-Cement Admixtures. *Geotechnical and Geological engineering (Springer Science)*, 27, pp. 681-686.
- Hammad, A. H. (2013). Evaluation of soil cement properties with electrical resistivity. Msc Thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia.
- Larsson, S. (2001). Binder distribution in lime-cement columns. *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, 5(3), pp.111-122.
- Porbaha, A., Shibuya, S., Kishida, T. (2000). State of the art in deep mixing technology. Part III: geomaterial characterization. *Ground Improvement*, 4(3), 2000, p. 91–110.